TMSR 熔盐泵实时异常监测系统设计与开发

周文[1,2]　后接[1,*]
1（中国科学院上海应用物理研究所　上海 201800）
2（中国科学院大学　北京 100049）

摘要　熔盐泵是 2 MW 液态燃料钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor-Liquid Fuel，TMSR-LF1)回路系统的主要设备之一，承担着驱动熔盐在回路中循环的重要职责。熔盐泵运行的安全性和可靠性直接影响到反应堆运行的安全性和经济性，而状态监测是保证系统运行安全性和经济性的有效手段。为了能够及时发现设备及系统的运行异常，帮助操作员更快速掌握设备运行情况信息，为视情检修提供依据，基于 Windows 呈现基础(Windows Presentation Foundation, WPF)框架，采用 MVVM(Model-View-ViewModel)模式开发了熔盐泵实时异常监测系统，实现了熔盐泵监测模型管理、实时监测与报警、异常信号定位、日志查询等功能。测试结果表明，该系统准确有效，且具有较高的稳定性，能够为操作和运行人员提供有效信息，辅助运行决策。相较于传统的 DCS 阈值报警，提高了异常检测的及时性和有效性，为后续智能运行支持的应用实现奠定基础。

关键词　熔盐泵；实时监测；异常定位；WPF；软件开发

中图分类号　TL36

Design and Development of Real-Time Monitoring System for TMSR Molten Salt Pumps

Zhou Wen[1,2]　Hou Jie[1,*]
1(*Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)
2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China)*

Abstract　**[Background]**: The molten salt pump is one of the main equipment in the thorium based molten salt reactor circuit system, responsible for driving the circulation of molten salt in the circuit. The safety and economy of reactor operation are influenced by the safety and reliability of molten salt pump operation. State monitoring is one of the effective methods to ensure the safe operation of the system. **[Purpose]**: In order to detect abnormalities in equipment and system operation timely and provide a basis for condition based maintenance, a study was conducted on the state monitoring and abnormal signal localization of the molten salt pump system. **[Methods]**:A desktop application for the real-time monitoring system of molten salt pumps was developed based on the Windows Presentation Foundation (WPF) and Model-View-ViewModel(MVVM). The system is consisted of modules such as monitoring model management, real-time monitoring and alarm, abnormal signal localization, and log query. **[Results]**: The relevant operating parameters of the molten salt pump system can be centrally monitored by the system, and the current operating status of the equipment can be displayed in real-time. Signal parameters that may

---

基金资助：上海市“科技创新行动计划”启明星项目(扬帆专项)(基金号 No.23YF1457300)

第一作者：周文，女，1994 年出生，2019 年毕业于哈尔滨工程大学，现为博士研究生（2019 年于哈尔滨工程大学获硕士学位），研究领域：智能诊断与决策，E-mail：zhouwen@sinap.ac.cn

通信作者：后接，E-mail: houjie@sinap.ac.cn

收稿日期：2023-00-00，修回日期：2023-00-00

Supported by Shanghai Science and Technology Development Funds(Grant No.23YF1457300)

First author: Zhou Wen, female, born in 1994, graduated from Haerbin Engineering University in 2019, doctor student, (graduated from Haerbin Engineering University with a master’s degree in 2019), focusing on intelligent diagnosis and decision-making, E-mail：zhouwen@sinap.ac.cn

Corresponding author: Hou Jie, E-mail: houjie@sinap.ac.cn

cause abnormalities can be quickly provided after the abnormality occurred. **[Conclusions]**: The necessary operational information can be provided by the system for operators. The system is helpful for operators to make operational decisions. Compared to traditional DCS threshold alarms, the timeliness and effectiveness of monitoring have been improved. The foundation for the subsequent application implementation of intelligent operation support is laid.

Key words Molten Salt Pump, Real-time Monitoring, Anomaly localization, WPF, software development

核能系统的运行安全一直是人们关注和研究的焦点。设备部件故障可能导致停机或严重事故，或传感器不准确可能导致偏离最佳运行[1]，严重影响反应堆的安全和经济性。作为第四代反应堆中的六种堆型之一，熔盐堆在固有安全性、经济性等方面具有明显的优势[2-3]。而熔盐泵是钍基核能系统的心脏设备，其运行的安全可靠性影响着反应堆运行的安全性和经济性。状态监测是保证系统安全运行的有效方法之一。数字化仪控系统的广泛应用为操纵员提供了一套全新的反应堆运行和监测技术手段[4]。现阶段对于设备状态监测研究可分为基于机理分析的方法和基于数据驱动的方法。机理分析方法不适用于结构复杂、非线性强的监测设备[5]。而随着传感器技术以及人工智能技术的发展，智能算法支持的基于数据驱动的方法研究被广泛应用于状态监测领域[6-9]。状态监测技术在向综合监测以及高灵活性和高智能性方向发展，引入机器学习、深度学习等智能方法实现高精度和高可靠性的状态监测。

目前，熔盐反应堆依然使用基于分布式集散控制系统的单点报警，缺乏有效的多维参数集中监测功能，无法在故障早期及时给出预警信号，更无法在故障发生后定位异常信号。因此，设计了基于主元分析(Principal Component Analysis, PCA)和贡献图的状态监测和异常信号定位的方法，并对 PCA 模型的不可检测区间进行了定量计算以获得更好的监测效果；针对传统贡献图的涂抹效应导致定位结果不准确的问题对贡献图算法进行了改进。相应算法的设计、实现及验证可参考文献[1]。在此研究基础上，本文将算法集成，开发相应的系统软件，采用高度集成的图形用户界面，以实现相应的状态监测、异常定位等功能。

本文采用 Windows 呈现基础(Windows Presentation Foundation, WPF)框架开发了一套熔盐泵实时异常监测系统，包括模型训练、在线监测、异常报警、异常定位、日志查询等模块。系统具有良好的可扩展性和可移植性，且具有友好的人机界面，最大化地将关键信息集中显示，符合相关人员的操作习惯。实现了准确有效的异常报警及定位，能够帮助现场操纵员及时准确地了解设备的运行状态以及异常参数变化情况，提高了设备运行的安全性和经济性，减少计划外的维护和短时间的停机所造成的损失。

1 总体设计方案

为了保证熔盐泵的安全可靠运行，需要实时监测熔盐泵的运行状态。设备运行出现异常或故障时能够及时地给出预警报警，定位异常信号，帮助现场操纵员了解设备的运行状态、提供可供分析的有效信息，辅助操作员进行运行和维修决策，减轻操作员精神压力，采取恰当措施。系统需采集熔盐泵运行相关参数，包括泵电机轴承振动和温度、泵轴承振动和温度等参数，随后通过 PCA 监测模型得到当前运行状态统计值，若该值超过限值则判定为异常，并通过贡献分析方法定位可能导致异常的信号参数。因此系统界面需能够显示实时监测曲线、报警信息、定位信息、信号实时数据等，并将相关异常信息记录到日志文件中以便后续查询。

1.1 系统结构

监测系统结构如图 1 所示。系统结构分为三部分，分别为数据采集、数据处理以及应用显示。NuCON 平台为熔盐堆的分布式控制系统，通过实验物理及工业控制系统（Experiment Physics and Industrial Control System，EPICS）的 IOC（Input Output Controller）获取设备实时运行数据[10-13]。通过监测模型计算得到当前设备运行状态，相应结果显示在程序界面中。

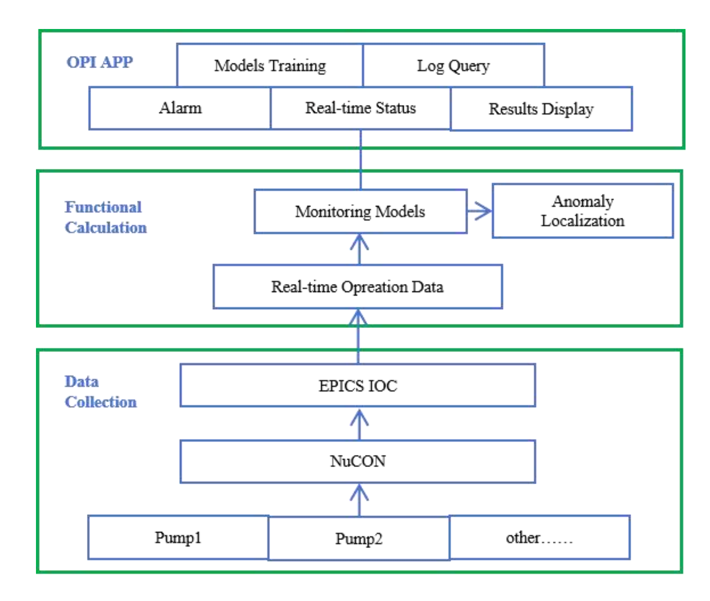


图 1 监测系统结构示意图

Fig.1 Structure of Monitoring System

1.2 功能设计

熔盐泵监测系统在 Microsoft Visual Studio 2022 环境上基于.Net Core 6.0 采用 C#10.0 编程语言开发。开发的桌面应用程序采用的是 WPF 框架，软件设计采用 Model-View-ViewModel (MVVM) 模式，将称为视图(View)的 XAML 用户界面、基础数据（Model）和视图与模型之间的中介（ViewModel）三层分离[14-17]。软件获取燃料盐泵和冷却盐泵的相关运行数据实时显示在界面中，并对数据进行实时计算处理，以曲线的方式动态展示泵当前运行状态。系统功能如图 2 所示。

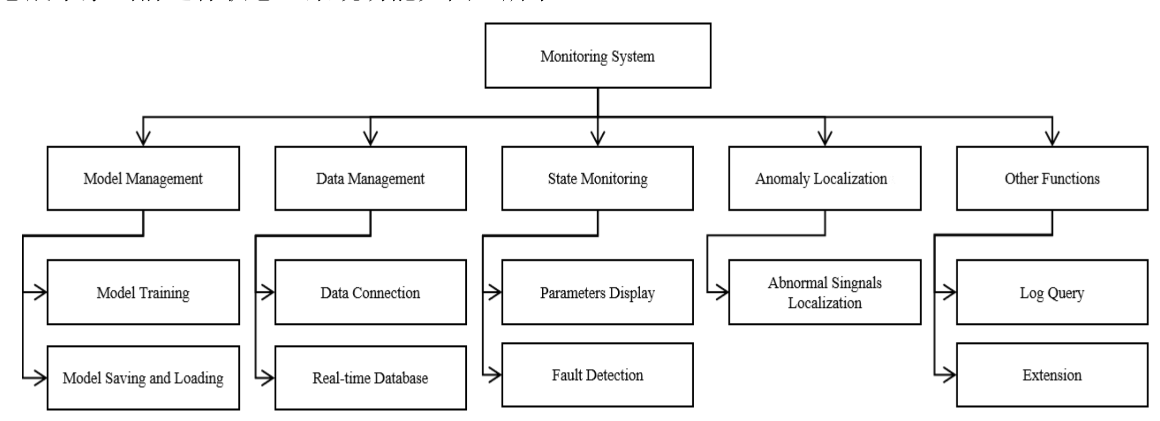


图 2 系统功能示意图

Fig.2 Schematic Diagram of System Functions

系统运行首先需进行数据连接以获取实时数据，数据连通后主界面即显示泵运行转速、电流、频率等重要参数，也可通过侧边栏页面查看冷却盐泵和燃料盐泵的其他数据。在进行监测前，首先要加载合适的监测模型，加载成功后显示相应统计值限值。为保证模型更新的及时性，设置了模型在线训练模块，可自由设置模型参数及训练时间，在线训练模型；同时也可通过历史数据离线训练模型。训练结束会弹出提示完成训练的对话框；完成训练后，可保存模型备用，模型保存名称默认为日期+训练时长。当判定设备为异常状态时，界面会实时显示当前的异常信息；选择相应日期可查询历史运行日志记录。该日志只记录异常情况信息，包括日期、时间，以及异常信号定位信息。该信息保存至本地文件，也可到相应文件夹中的文件进行查询。

1.3 流程设计

图 3 所示是设备状态监测系统的业务流程图。其流程主要分为两大部分：第一，将监测模型与实时运行的设备运行数据进行连接;采用 EpicsSharp 访问 EPICS 服务器实时获取数据。EpicsSharp 是一个用于.NET 平台的软件库，用于实现 EPICS 使用的通道访问协议[18-19]。第二，利用离线数据或在线数据训练 PCA 监测模型。最终，利用 PCA 模型设备运行状态进行实时监测，在检测到异常或者故障发生时给出报警信号，同时定位导致异常的信号参数。最后，相关异常报警及定位信息通过人机界面传递给主控室的操纵人员，帮助操纵人员做出正确决策。

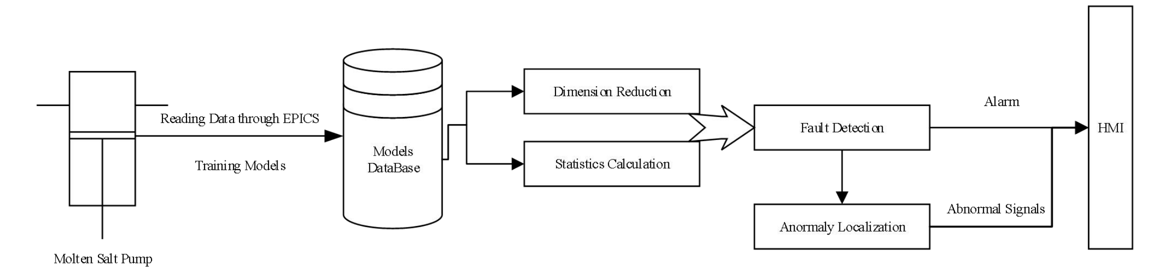


图 3 业务流程示意图

Fig.3 Schematic Diagram of Operation

1.4 人机界面设计

主界面主要包括五个部分：上部菜单栏：包括窗口最小化，最大化，关闭以及连接实时数据库按钮；左侧侧边栏：包括相应页面弹出按钮；界面上部关键参数显示：在数据连接之后，可实时显示设置的重要参数的数值；实时监测结果画面：分为不同的 TAB 页面，对应于不同的设备，可实现开始/停止监测，监测曲线会实时显示在图中，若出现异常，相应按钮会变为红色；下方监测信息显示：当出现异常时，下方蓝色区域将会显示日期、时间以及可能导致的异常的信号名称。

2 监测及异常定位方法介绍

2.1 PCA 监测模型

多元统计分析是过程监测的常用方法，具有处理大量高度相关变量的优越性。PCA 是多元统计过程监测最常用的方法之一。通过将多维度的高度相关的传感器数据简化为一小组不相关的潜在变量，大大降低了监测的繁复程度[1]。PCA 状态监测的思想如下：将数据向量分别投影到两个正交空间：主元空间和残差空间。随后，在相应的子空间中建立统计量，进行假设检验。采用 Hotelling T 平方(T^2)和平方预测误差(Squared Prediction Error, SPE)作为检测统计量。T^2 统计量表示主元空间的变化程度，SPE 统计量表示残差空间中数据投影的变化程度。将结果与相应的控制限值进行比较，可以确定是否发生了故障。计算方法如下[1]：

PCA 将数据矩阵 **X** 分解为主成分空间和残差空间：

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}\mathbf{P}^T + \mathbf{E} \tag{1}$$

其中，$\mathbf{X} \in R^{N\times m}$ 表示一个包含 m 个传感器变量和 n 个样本的数据矩阵；**T** 为分数矩阵，**P** 为负荷矩阵，**E** 为残差矩阵。

SPE 和 T^2 统计数据的定义如下：

$$T^2 = \mathbf{x}\mathbf{P}\mathbf{\Lambda}^{-1}\mathbf{P}^T\mathbf{x}^T \tag{2}$$

$$SPE = \|\mathbf{e}\|^2 = (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})^T \tag{3}$$

x 是样本向量，$\hat{\mathbf{x}}$ 是重建向量，$\mathbf{\Lambda}$是具有特征值的对角矩阵，**I** 是单位矩阵.

SPE 控制限 Q_α可以通过χ^2 分布计算得到。当显著性水平为α时，Q_α的计算公式是

$$Q_\alpha=\theta_1\left[\frac{z_\alpha h_0\sqrt{2\theta_2}}{\theta_1}+1+\frac{h_0\theta_2\left(h_0-1\right)}{\theta_1^{\ 2}}\right]^{\frac{1}{h_0}} \tag{4}$$

其中，$h_0=1-\frac{2\theta_1\theta_3}{3\theta_2^{\ 2}};\theta_i=\sum_{j=A+1}^{m}\lambda_j^i(i=1,2,3)$，$A$ 为主成分数，λ为对应的特征值；z_α是在显著性水平α上的正态分布的临界极限。

T^2 控制极限可以通过 F-分布来计算。当显著性水平为α时，T^2 控制限为：

$$T_\alpha^2=\frac{\left(N^2-1\right)A}{N\left(N-A\right)}F_\alpha\left(A,N-A\right) \tag{5}$$

$F_\alpha\left(A,n-A\right)$表示显著性水平 1-$\alpha$下自由度 n 和 n-A 的 F 分布值。

根据累积方差贡献率选择主成分数，即：

$$CPV=\frac{\sum_{i=1}^{A}\lambda_i}{\sum_{i=1}^{m}\lambda_i} \tag{6}$$

2.2 异常信号定位

在 PCA 检测到异常后，有必要进一步定位引起报警的变量。贡献分析只使用过程数据来定位故障变量，无需任何先验的故障知识，是一种无监督的方法。贡献图实际上反映了各种变量的变化对系统统计模型稳定性的影响[1]。通过比较每个变量的贡献来确定异常信号，其计算方法如下[1]：

公式(2)和(3)的统计计算可统一表示为：

$$S\left(x\right)=\mathbf{x}\mathbf{E}\mathbf{x}^T=\left\|\mathbf{x}\right\|_{\mathbf{E}}^2 \tag{7}$$

假设信号 j 失效，样本 $\mathbf{x}$ 可以表示为：

$$\mathbf{x}=\mathbf{x}^*+\boldsymbol{\xi}_j f_j \tag{8}$$

$\mathbf{x}^*$表示数据的正常部分；f_j 表示信号 j 的故障大小.

$$\xi_j=[\underbrace{0\ldots0}_{\text{j-1}},1,\underbrace{0\ldots0}_{m-j}] \tag{9}$$

ξ_j 表示故障 j 的方向。它可以是一个任意的过程故障方向。

沿ξ_j 方向的重构向量可以表示为：

$$\mathbf{z}_j=\mathbf{x}-\xi_j f_j \tag{10}$$

变量 $\mathbf{x}$ 对故障检测指数的基于重构的贡献定义为：

$$RBC_j^S=\left\|\boldsymbol{\xi}_j\hat{f}_j\right\|_E^2 \tag{11}$$

其中，

$$\hat{f}_j=\left(\boldsymbol{\xi}_j\mathbf{E}\boldsymbol{\xi}_j^T\right)^{-1}\boldsymbol{\xi}_j\mathbf{E}\mathbf{x}^T \tag{12}$$

是

$$\min_{f_j}\left(\mathbf{z}_j\mathbf{E}\mathbf{z}_j^T\right)=\min_{f_j}\left\|\mathbf{z}_j\right\|_{\mathbf{E}}^2=\min_{f_j}\left\|\mathbf{x}-\xi_j f\right\|_{\mathbf{E}}^2 \tag{13}$$

最优解

将公式（12）代入公式（11），其计算方法为：

$$RBC_j^S = \mathbf{x}\mathbf{E}\xi_j^T\left(\xi_j\mathbf{E}\xi_j^T\right)^{-1}\xi_j\mathbf{E}\mathbf{x}^T \tag{14}$$

RBC_j^S 对样本的每个传感器方向进行相应计算。

3 系统测试

为了测试熔盐泵监测系统的可行性和有效性，对该系统进行了现场验证，将其应用于某钍基熔盐反应堆项目。实时故障检测及异常定位是该系统最重要的两个功能，因此重点讨论这两个功能的测试结果。采用该系统实时监测一回路燃料盐泵，当泵出于正常状态运行时，运行监测曲线在阈值之下偶有波动，指示泵此时为正常运行情况；当泵的某一振动信号数据突然异常上升时，运行监测曲线也随之升高超过限值，燃料盐泵 TAB 标签变为红色，指示泵此时运行状态为异常情况。图 4 展示了某天监测过程中产生的报警情况。图 5 展示了当天完整的监测曲线图。



图 4 监测效果展示

Fig.4 Display of Monitoring

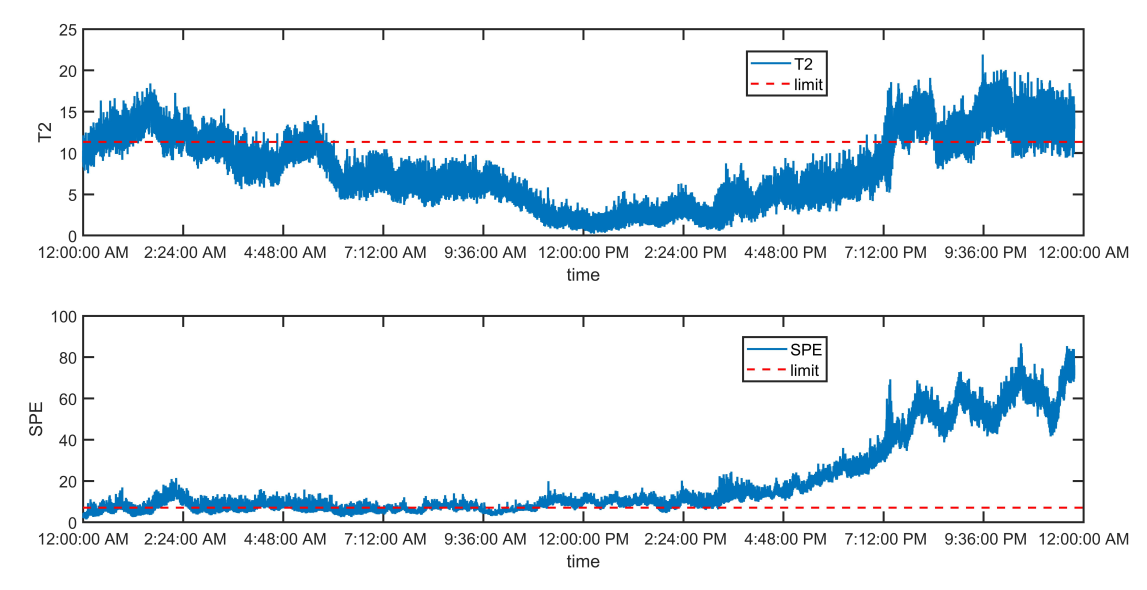


图 5 全天监测曲线

Fig.5 Display of full day monitoring curves

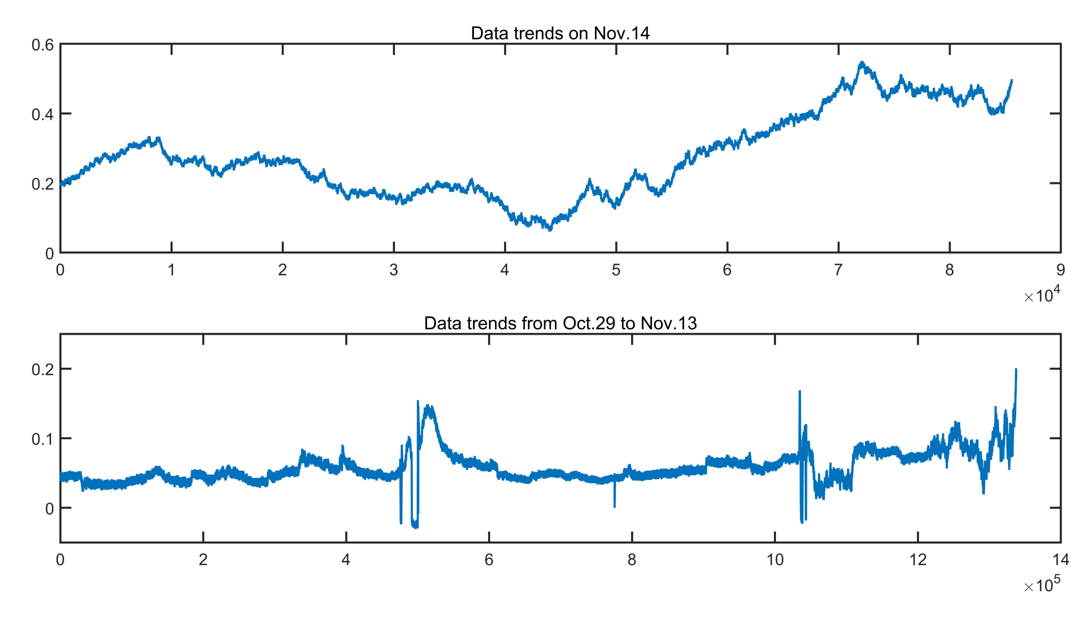


图 6 异常信号运行趋势

Fig.6 Abnormal signal operation trends

从图 5 中可以看出，大约在当天下午 2:24 分之后，监测曲线完全超过限值并持续升高，这说明异常程度在持续增大。定位结果显示可能导致异常的信号为燃料盐泵某振动信号，实际考察发现该信号确有异常。查询该信号历史数据，经计算可得到，报警当天该信号数据均值为 0.2754，标准差为 0.1170；报警前半月该信号数据均值为 0.0575，标准差为 0.0225；说明该信号在报警日数值增加且波动变大。该信号原始数据趋势如图 6 所示，从图 6 中也可看出信号数值有明显上升趋势。而针对该信号的变化，DCS 并无报警。

该结果表明，监测系统可以对熔盐泵的状态进行有效监测，并且正确定位异常信号，具有较高的准确性；同时，对系统进行了长时间的运行调试、测试和优化，该系统满足每秒实时监测的需求，具有较高的稳定性。

4 结语

状态监测系统的应用可以在很大程度上减轻运行人员的心理压力，降低误操作的概率，对反应堆的安全稳定运行至关重要。本系统采用 PCA 监测方法及基于改进重构贡献图法的异常信号定位，提高了设备的状态监测性能，能够及时、准确地对设备的异常状态报警，降低了漏报和误报几率。在此基础上设计开发出了一套状态监测、故障报警、异常信号定位于一体的设备状态监测系统，完成实时异常检测、异常定位等多个功能模块的设计开发。系统所采用的监测方法实用性强；软件具有简单、明了的界面设计，实现友好的人机交互方式，对设备运行状态进行有效的监测；且具有较强的扩展性，可同时监测多个设备。测试分析结果表明，系统达到了预期目标，具有良好的监测效果，对提高熔盐泵运行的安全可靠性和经济性起到了积极的作用，同时也为进一步的运行支持技术以及智能运维技术的研究和实现奠定基础。

作者贡献说明：周文：开展研究，文章撰写；后接：文章审阅并提供指导性建议。

参考文献

1 Zhou Wen, Hou Jie. Implementation of Fault Isolation for Molten Salt Reactor Using PCA and Contribution Analysis[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 173: 109138. DOI: 10.1016/j.anucene.2022.109138.

2 徐洪杰，戴志敏，蔡翔舟，王建强. 钍基熔盐堆和核能综合利用[J]. 现代物理知识, 2018,30(04): 25-34. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.007.

XU Hongjie, DAI Zhimin, CAI Xiangzhou, WANG Jianqiang. Thorium molten salt reactor nuclear energy system &

Comprehensive Utilization of Nuclear Energy[J]. Modern Physics, 2018,30(04): 25-34. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.007.

3 蔡翔舟, 戴志敏, 徐洪杰. 钍基熔盐堆核能系统[J]. 物理, 2016, 45(09): 578-590. DOI：10.7693/wl20160904.

CAI Xiangzhou, DAI Zhimin, XU Hongjie. Thorium molten salt reactor nuclear energy system[J]. Physics, 2016, 45(09): 578-590. DOI：10.7693/wl20160904.

4 朱少民，夏虹，彭彬森，等. 主泵故障诊断系统人机界面设计[J]. 自动化仪表, 2019, 40(6): 84–86, 92. DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2019030054.

ZHU Shaomin, XIA Hong, PENG Binsen, et al. Design of man- machine interface of fault diagnosis system of reactor coolant pump[J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(6): 84–86, 92. DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2019030054.

5 李振宝. 基于深度学习的典型液压泵智能故障诊断与寿命预测方法[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.

LI Zhenbao. Intelligent fault diagnosis and life prediction method of typical hydraulic pump based on deep learning[D].Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.

6 曾聿赟. 基于状态监测数据的核电厂设备寿命预测算法研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.

ZENG Yuyun. Research on Life Prognosis Methods of Nuclear Power Plant Assets Based on Condition Monitoring Data[D]. Beijing: Tsinghua University,2017.

7 孟佳东. 滚动轴承早期故障检测与健康状态评估方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.

MENG Jiadong. Incipient Fault Detection and Health Condition Assessment of Rolling Element Bearing[D].Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.

8 马鑫. 数据驱动的动态过程监测理论及其工业应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2022.

MA Xin. Data-Driven Dynamics Process Monitoring Theory and ITS Industrial Applications[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.

9 徐卫晓. 基于深度学习混合模型的滚珠丝杠副系统状态监测与寿命预测研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.

XU Weixiao. Research on Condition Monitoring and Life Prediction of Ball Screw Pair System Based on Deep Learning Hybrid Model. Qingdao: Qingdao University of Technology,2023.

10 朱晨晨，韩立欣，后接. TMSR-SF0 控制系统与保护系统通讯方案的设计与实现[J]. 核技术, 2021, 44(2): 020601 DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.020601.

ZHU Chenchen, HAN Lixin, HOU Jie. Design and implementation of communication scheme between TMSR-SF_0 control system and protection system[J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(2): 84–90. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.020601.

11 余嘉莉，陈永忠，韩利峰. 基于 Qt 的 TMSR 熔盐泵试验台架控制系统[J]. 核技术, 2022, 45(6): 060603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060603.

YU Jiali, CHEN Yongzhong, HAN Lifeng. The control system for TMSR molten salt pump experimental platform based on Qt[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(6): 87–94. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060603.

12 李嘉曾，韩利峰，李丹清，黄文博，等. 基于大数据平台的 EPICS 历史数据归档系统[J]. 核技术, 2019, 42(11): 110603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.110603.

LI Jiazeng, HAN Lifeng, LI Danqing, HUANG Wenbo, et al. EPICS historical data archiving system based on big data platform[J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(11): 110603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.110603.

13 何越，程懋松，戴志敏. TMSR 云仿真平台初步设计与实现[J]. 核技术, 2018,41(7): 070603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.070603.

HE Yue, CHENG Maosong, DAI Zhimin. Preliminary design and implementation of TMSR cloud simulation platform[J]. Nuclear Techniques, 2018,41(7): 070603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.070603.

14 张玉民，何鑫，杨百川. 基于ＷＰＦ技术的无人机地面站软件设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2019,40(4): 1167-1172. DOI：10.16208/j.issn1000-7024.2019.04.043.

ZHANG Yumin, HE Xin, YANG Baichun. Design and Implementation of UAV Ground Station Software Base on WPF Technology[J]. Computer Engineering and Design, 2019,40(4): 1167-1172. DOI：10.16208/j.issn1000-7024.2019.04.043.

15 尚旭明，张立成. 基于 WPF 的三维仿真系统的研究与应用[J]. 计算机技术与发展, 2016,26(9): 39-42. DOI: 10.3969/j.issn.1673-629X.2016.09.009.

SHANG Xuming, ZHANG Licheng. Research and Application of 3D Simulation System Based on WPF[J]. Computer Technology and Development, 2016,26(9): 39-42. DOI: 10.3969/j.issn.1673-629X.2016.09.009.

16 邓成，孙书会．MVVM 设计模式的前端应用[J]. 电脑知识与技术，2019, 15(29): 249-250. DOI:10.14004/j.cnki.ckt.2019.3506.

DENG Cheng, SUN Shuhui. Front-end application of MVVM design pattern[J]. Computer Knowledge and Technology, 2019, 15(29): 249-250. DOI:10.14004/j.cnki.ckt.2019.3506.

17 陈涛．MVVM 设计模式及其应用研究[J]. 计算机与数字工程，2014,42(10): 1982-1985. DOI: 10.3969/j.issn1672-9722.2014.10.05.

CHEN Tao. MVVM Design and Its Application[J]. Computer & Digital Engineering, 2014,42(10): 1982-1985. DOI: 10.3969/j.issn1672-9722.2014.10.05.

18 张玉亮，徐广磊，朱鹏，等．基于 C#的 EPICS 应用程序开发及其应用研究[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(10): 1234–1236, 1255.

ZHANG Yuliang, XU Guanglei, ZHU Peng, et al. Development and Implementation of C# Based EPICS Application[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 33(10): 1234–1236, 1255.

19 岳敏，袁超，苟世哲，张玮，等．基于 C#的 SECRAL-II 数据归档系统[J]. 核技术, 2017,40(3): 030402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.030402.

YUE Min, YUAN Qian, GOU Shizhe, ZHANG Wei, et al. Data archive system of SECRAL-II based on C#[J]. Nuclear Techniques, 2017,40(3): 030402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.030402.